

# 嘉陵江流域输沙量演变规律分析

宋凤军<sup>1</sup>, 穆兴民<sup>1,2</sup>, 白桦<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**嘉陵江流域水土流失严重,是长江流域重点产沙区之一,研究流域输沙量演变规律及其影响因素,对揭示其水土流失规律及人类活动水文效应具有重要意义。基于嘉陵江北碛站月及年输沙量,分析了流域输沙量演变规律及流域内人类活动对输沙量的影响。结果表明:年输沙量总体呈降低趋势,1980s—1990s 年输沙量波动程度相对较大;流域年输沙量在 1992 年发生突变,突变年份后年径流量有所增加,年输沙量明显减少,突变年份后年输沙量波动程度加剧;年内输沙量主要集中在汛期(7—9 月),占全年 72% 以上,总体变化呈单峰型;根据北碛站 1956—2008 年降雨—输沙双累积曲线,流域输沙量相对降雨量在 1984 年发生突变,降水和人类活动在突变年份前后对输沙量衰减的影响分别为 25% 和 75%,人类活动的影响占据了主导地位。

**关键词:**嘉陵江; 输沙量; 水土保持; 泥沙变化

中图分类号:P332.5;TV148.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)05-0065-05

## Variation of Sediment Discharge in the Jialingjiang River Basin

SONG Feng-jun<sup>1</sup>, MU Xing-min<sup>1,2</sup>, BAI Hua<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Severe soil erosion in the Jialing River Basin contributes to large amount of sediment yields in the upper reaches of the Yangtze River. Analysis on variation of sediment discharge is helpful to understand the mechanism of soil erosion and impacts of human activities. This paper applied the Mann—Kendall test and double mass curve methods to detect the variation of annual and monthly sediment flux at Beibei station in the Jialing River. The results indicated that a general decline in sediment discharge was detected, and the changing point at 1992 was found. Furthermore, the streamflow showed slight increasing trend, while the sediment flux reduced significantly at 95% confidence level. Sediment yield mainly occurred during the flood season from July to September, accounting for more than 72% of the annual amount. Double curve analysis between sediment flux and precipitation showed two stages for the whole study period I (1956—1984) and II (1985—2008). Soil and water conservation is responsible for the notable reduction in sediment flux, accounting for about 75%.

**Key words:** Jialing River; sediment discharge; soil and water conservation; variation of sediment

嘉陵江流域是长江上游重点产沙区之一。按 1950—1979 年的资料统计,嘉陵江流域面积只占长江上游的 15.5%,其径流量占上游的 14.7%,但来沙量占全上游的 30.5%,控制嘉陵江水土流失,对减少三峡库区的淤积、保持三峡水库库容的长期使用具有重要的意义<sup>[1]</sup>。

嘉陵江流域的 76 个县市,有 50 个县市展开了水土流失重点治理。自“长江上游水土流失重点治理”工程实施以来,截至 1996 年底,嘉陵江流域共治水土流失面积 21 361 km<sup>2</sup>,占流域内水土流失总面积的 25.8%<sup>[1]</sup>。许多研究表明,嘉陵江流域的产沙量表现出明显的减小趋势<sup>[2-5]</sup>。长江水利委员会水文

收稿日期:2012-03-12

修回日期:2012-04-17

资助项目:中荷联合主题研究项目[(中国科学院对外合作重点项目计划,GJHZ1018)和(Netherlands Organization for Scientific Research, NWO, ONDI339291)];国家科技支撑计划项目(2006BAD09B00);欧盟第六框架计划项目(EU FP6,37046)

作者简介:宋凤军(1987—),男,山东人,硕士研究生,研究方向:水土保持与荒漠化防治。E-mail:songfengjun2008@163.com

通信作者:穆兴民(1961—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事生态学、水土保持学以及生态水文学的科教与实践工作。E-mail:xmmu@ms.iswc.ac.cn

局对嘉陵江输沙量演变规律进行了大量研究<sup>[2-3]</sup>。结果表明,流域出口北碚站 1992—1998 年间平均减沙量 5 500 万 t,减少幅度为 53.3%<sup>[3]</sup>。张信宝等<sup>[4-5]</sup>、府仁寿等<sup>[6]</sup>、许全喜等<sup>[7]</sup>研究了包括嘉陵江流域在内的长江上游若干支流的水沙变化趋势,对嘉陵江输沙量减少的趋势进行了探讨。毛红梅等<sup>[8]</sup>、杜俊等<sup>[9]</sup>研究了人类活动对包括嘉陵江流域在内的长江上游输沙变化的影响。结果显示,嘉陵江流域产沙量的减少,既与包括水库拦沙、水土保持措施减沙等在内的人类活动有关,又与气候变化有关。北碚站作为嘉陵江流域出口控制站,对其输沙量资料进行分析,可为深入了解河流水沙变化及其可能影响因素提供一定的基础。本文基于嘉陵江北碚站 1956—2008 年年输沙量资料,采用时间序列分析法中的秩次序趋势分析法对流域输沙量演变规律进行分析,并运用数学模型定量分析人类活动对流域输沙量的影响,以期对深入认识流域输沙量未来演变规律提供一定的依据。

## 1 流域概况

嘉陵江发源于秦岭南麓,流经陕西、甘肃、四川、重庆四省市,干流全长 1 120 km,流域面积约 16 万 km<sup>2</sup><sup>[10]</sup>。流域包括嘉陵江干流、渠江、涪江三大水系,干流自北向南,渠江自东北向西南,涪江自西北向东南,三大水系在合川附近汇合,构成扇形向心水系。流域地势东、北、西三面较高,向东南高程逐渐降低,地势渐趋平缓。各水系上游均为山区,河谷狭窄,河床比降大,两岸耕地少。干流自广元以下河谷逐渐开阔,地形从深丘逐步过渡到浅丘,河曲、阶地和冲沟发育,与涪江、渠江中下游构成川中盆地,人口稠密,农业发达<sup>[1]</sup>。

嘉陵江是长江支流中流域面积最大的河流,也是长江流域重点产沙区之一。嘉陵江的泥沙有 2/3 来自支流,不足 1/3 来自干流,而西汉水、白龙江两河是嘉陵江流域支流上的重点产沙区,涪江和渠江是嘉陵江最大的两条支流,河长面广水量大,但是含沙量并不高<sup>[11]</sup>。该流域是长江各大支流中水土流失比较严重的地区,全流域水土流失面积达 8.28 万 km<sup>2</sup>,占流域总面积的近 52.0%,侵蚀模数平均为 2 288 t/(km<sup>2</sup>·a),多年平均输沙量 1.40 亿 t,是长江上游重点产沙区域之一<sup>[12]</sup>。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料

本研究选择嘉陵江流域出口控制站北碚水文观测站 1956—2008 年逐年实测月年输沙量资料,来自

《中国河流泥沙公报》;降雨资料来源于中国气象科学数据共享服务网。

### 2.2 方法

(1) 趋势分析。采用 Mann—Kendall 趋势检验方法(简称 M—K 方法)进行输沙量年际变化趋势分析<sup>[13]</sup>。M—K 法是用来评估气候要素时间序列趋势的常用检验方法之一,其适用范围广、定量化程度高,检验统计量公式为:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (1)$$

式中:sign()——符号函数。当  $x_i - x_j$  小于、等于或大于零时,sign( $x_i - x_j$ ) 分别为 -1, 0 或 1; M—K 统计量公式分别在  $S$  大于、小于或等于零时为  $Z$ 。

$$Z = \begin{cases} (s-1)/\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ (s+1)/\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & s < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Z$ ——正值表示增加趋势,负值表示减少趋势。 $Z$  的绝对值在大于等于 1.28, 1.64, 2.32 时分别表示通过 90%, 95%, 99% 置信度显著性检验。其统计量  $\tau$ , 方差  $\delta^2$  和标准化变量  $M$  的计算公式分别为:

$$\tau = \frac{4P}{N(N-1)} - 1 \quad (3)$$

$$\sigma_\tau^2 = \frac{2(2N+9)}{9N(N-1)} \quad (4)$$

$$M = \tau / \sigma_\tau \quad (5)$$

式中: $P$ ——径流系列所有对偶观测值 ( $R_i, R_j, i < j$ ) 中,  $R_i < R_j$  出现的次数;  $N$ ——系列长度。

(2) 趋势性突变。本文采用 Mann—Kendall 突变点分析方法检测年输沙量趋势性突变年份<sup>[13]</sup>。当检验序列突变时检验统计量与上述  $Z$  有所不同,通过构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_{ij} \quad (6)$$

$$\text{其中, } \alpha_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases}$$

$1 \leq j \leq i$ , 定义统计变量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中: $E(S_k) = k(k+1)/4$ ;  $\text{var}(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72$ 。

$UF_k$  为标准正太分布,给定显著性水平  $\alpha$ ,若  $|UF_k| > U_{\alpha/2}$ ,则表明序列存在显著的趋势变化。将时间序列  $x$  按逆序排列,再按照上式计算,同时使:

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k \\ k = n+1-k \end{cases} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

如果  $UF_k$  和  $UB_k$  这两条曲线出现交点,且交点

在临界直线之间,那么交点对应的时刻就是突变开始的时刻。

(3) 人类活动对输沙量的影响。采用双累积曲线分析降雨和人类活动对流域输沙量衰减的影响,利用数学模型计算人类活动对输沙量的衰减影响,探寻人类活动在输沙量变化中的影响幅度。

### 3 结果与分析

#### 3.1 输沙量的年际变化

对流域输沙量的年际变化主要从流域输沙量的波动程度、年际变化趋势、阶段性以及异常年份进行分析,从而得出流域年际输沙量的变化特征。

3.1.1 年输沙量波动 嘉陵江北碛站输沙量特征值如表 1 所示。1970s 输沙量的  $C_v$  值为 0.20, 最小; 1980s 和 1990s 输沙量的  $C_v$  值为 0.70, 最大; 而 1950s, 1960s, 2000s 输沙量的  $C_v$  值差别不大, 相对比较稳定。说明流域输沙量在 1950s 和 1960s 波动程度相对较小, 1970s 波动程度相对最小, 1980s 和 1990s 波动程度相对最大, 而到 2000s 以后, 输沙量波动程度又趋于平缓。

3.1.2 输沙量年际变化趋势 嘉陵江北碛站年输沙量变化过程如图 1 所示。北碛站在 1980s 后期直到 2000s 输沙量较 1980s 中期以前呈显著下降趋势。对输沙量数据计算特征值并进行 M—K(显著性水平  $\delta=0.05$ , 相应检验临界值  $M_\delta=1.96$ ) 趋势检验, 结果如表 1 所示。表 1 中, 流域输沙量 1960s 达到最高值 1.80 亿 t, 到 1990s 输沙量骤降至 0.50 亿 t, 到 2000s 已经降到 0.20 亿 t, 输沙量呈显著降低的趋势; 输沙量 Mann—Kendall 秩相关系数达到 0.01 信度的显著性水平, 秩相关系数为 -5.853,  $|M_{\text{输沙量}}| > |M_\delta|$  表明: 随时间推移, 流域输沙量呈明显降低的趋势, 输沙量年均递减系数为 0.03 亿 t/a。

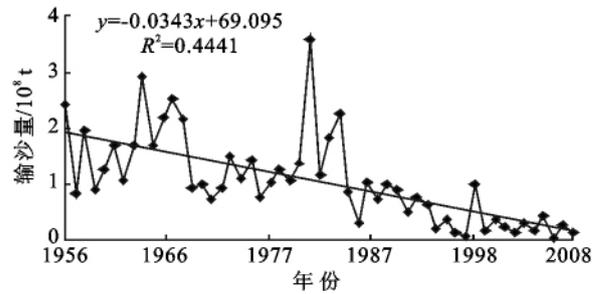


图 1 嘉陵江流域北碛站 1956—2008 年实测输沙量变化过程

表 1 嘉陵江流域不同年代输沙量特征值

系列	最大值/ 万 t	最小值/ 万 t	极值比	平均值/ 万 t	$C_v$ 值	Mann—Kendall Z 检验统计量	显著性 水平
多年平均	3.56	0.03	104.70	1.05	0.80	-5.853	0.01
1950s	2.42	0.80	3.00	1.50	0.50	—	—
1960s	2.93	0.90	3.21	1.80	0.40	—	—
1970s	1.51	0.73	2.07	1.10	0.20	—	—
1980s	3.56	0.29	12.11	1.40	0.70	—	—
1990s	0.99	0.06	16.23	0.50	0.70	—	—
2000s	0.42	0.03	12.44	0.20	0.50	—	—

#### 3.1.3 输沙量突变年份及突变年份前后的变化特征

突变年份的检验主要是利用 M—K(显著性水平  $\alpha=0.05$ ) 突变点分析方法。图 2 为 Mann—Kendall 突变点检验图, 表 2 为所测突变年份以及突变年份前后的输沙量变化特征值。M—K 检验表明, 北碛站年输沙量从 1992 年发生了显著的减少趋势, 年平均输沙量由 1992 年之前的 0.90 亿 t 降至 1992 年之后的 0.31 亿 t, 减少幅度为 65%, 输沙量在突变年份后大幅度减少。

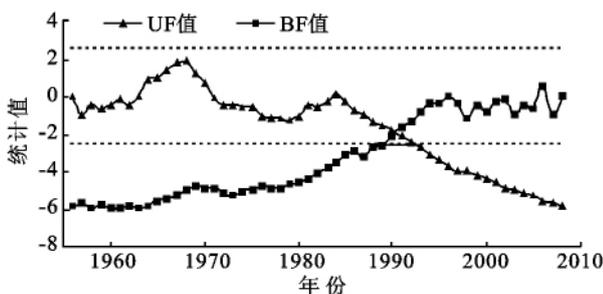


图 2 北碛站年输沙量突变点检验

年输沙量的  $C_v$  值和极值比分别由突变年份之前的 0.52 和 12.1 升至突变年份后的 0.82 和 29.1, 表明年输沙量在突变年份之后较突变年份之前发生了较大的波动。

#### 3.2 输沙量年内变化

为研究输沙量年内变化规律, 分别对各季度和各月份输沙量进行计算, 图 3, 4 分别为各季度输沙量占全年比例以及各月输沙量在全年的分配情况。通过计算得知, 流域内第二季度、第三季度即 6—8 月和 9—11 月的总输沙量占了全年总输沙量的 90% 以上, 而第一季度和第四季度, 即 1—3 月份以及 12 月至翌年 2 月这 6 个月总输沙量不足全年总输沙量的 10%, 其中第四季度输沙量占全年比例基本为 0; 7—9 月这 3 个月输沙量最大, 其次为 5 月、6 月份和 10 月, 如果按汛期和主汛期来计算, 所测汛期 5—10 月份的输沙量占全年总输沙量的 97% 以上, 主汛期 7—9 月的输沙量占全年的 72% 以上, 年内输沙量变化总体呈明显的单峰型。

表 2 突变年份前后径流量输沙量变化特征值

项目	突变年份前(1956—1984年)		突变年份后(1985—2008年)		前后减少量		变化百分数	
	径流量/亿 m <sup>3</sup>	输沙量/亿 t						
年平均	488	0.90	558	0.31	-70	0.59	14%	65%
C <sub>v</sub> 值	0.24	0.52	0.26	0.82	—	—	—	—
最大值	1070	3.56	810	0.99	—	—	—	—
最小值	468	0.30	308	0.03	—	—	—	—
极值比	2.3	12.1	2.6	29.1	—	—	—	—

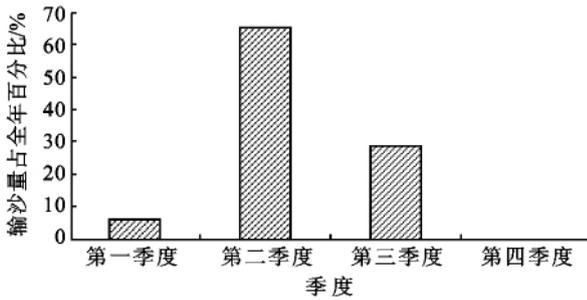


图 3 各季度输沙量所占全年比例

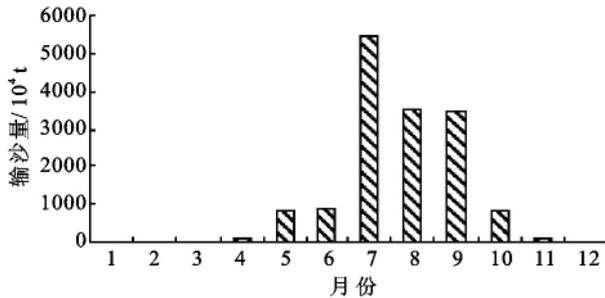


图 4 各月输沙量全年分配情况

#### 4 人类活动对输沙量的影响

影响输沙量的因素主要包括气候条件、流域下垫面条件以及人类活动三个方面。降雨的时空分布对流域的产沙具有直接影响，而人类活动例如水利工程、土地利用等可以改变流域的下垫面条件，因此，降雨和人类活动是导致输沙量变化的根本和直接原因。

嘉陵江流域输沙量整体变化趋势是降低的，为了更好地量化水土流失治理前后输沙量的变化，结合降水—输沙双累积曲线<sup>[14]</sup>（图 5）进行分析。图 5 中，斜率在 1968 年和 1984 年发生明显的变化，表明流域输沙量较降雨量在 1968 年和 1984 年发生变化，年输沙量分别为 2.15 亿 t 和 2.26 亿 t，故可将流域降水输沙演变关系分为三个阶段：I（1958—1968 年），II（1969—1984 年），III（1985—2008 年）。

为了消除降雨对输沙量的影响，令：

$$E = W_s / P \quad (9)$$

式中： $E$ ——侵蚀率（t/m<sup>3</sup>）； $W_s$ ——年输沙量（t）， $P$ ——径流量（m<sup>3</sup>），则：

$$W_s = E \times P \quad (10)$$

令相邻时段的平均值分别为  $W_{s1}$ 、 $W_{s2}$ ， $P_1$ 、 $P_2$  及

$E_1$ 、 $E_2$ 。对  $W_s = E \times P$  取全微分，并以差分式表示为：

$$\Delta W_s = W_{s1} - W_{s2} = (P_1 + P_2) / 2 \times (E_1 - E_2) - (E_1 + E_2) / 2 \times (P_1 - P_2) \quad (11)$$

式(11)也可以表示为： $\Delta W_s = -P \Delta E + E \Delta P$

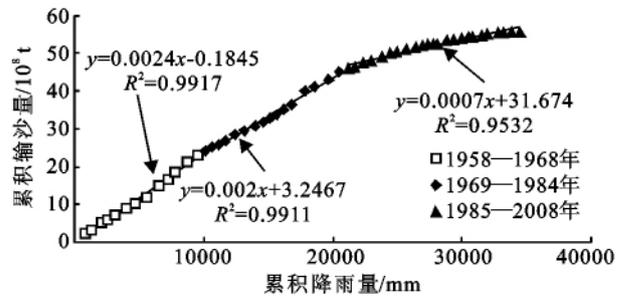


图 5 北碚站降水—输沙双累积曲线

结合降水—输沙双累积曲线和式(11)计算嘉陵江流域北碚站输沙量各阶段的变化量见表 3。第 I 阶段(1958—1968 年)至第 II 阶段(1969—1984 年)降雨量对输沙量的衰减影响为 0.08 亿 t，人类活动对输沙量的衰减影响为 0.36 亿 t，影响幅度分别为 19% 和 81%；第 II 阶段至第 III 阶段降雨量对输沙量的衰减影响为 0.04 亿 t，人类活动对输沙量的衰减影响为 0.80 亿 t，影响幅度分别为 5% 和 95%，输沙量的整体趋势是降低的，表明 1970s 以来，人类活动对输沙量的影响占据了主导地位，而降雨量对输沙量的影响幅度相对较小，尤其是 1980s 以后，人类活动对输沙量的影响更加明显，这也肯定了近年来水土流失治理取得的显著成效。

表 3 嘉陵江流域不同时段输沙量衰减原因分析

阶段	I (1958—1968 年)	II (1969—1984 年)	III (1985—2008 年)
$W_s$ /万 t	18306	13650	4397
$P$ /mm	1057	996	910
$E$ /(万 t·mm <sup>-1</sup> )	17	14	5
$\Delta W_s$	—	-4656	-9253
$\Delta P$	—	-61	-86
$\Delta E$	—	-4	-9
$E \Delta P$	—	-836	-414
$P \Delta E$	—	-3600	-8078
$P \Delta E + E \Delta P$	—	-4436	-8492

## 5 结论

(1) 通过对嘉陵江流域年输沙量的特征值计算及趋势检验,流域年输沙量 1980s—1990s 相对其他年代波动程度较大,流域输沙量在 1956—2008 年呈显著减少趋势。

(2) 利用 M—K 对嘉陵江流域年输沙量进行突变点检验,结果显示,流域年输沙量在 1992 年发生突变,突变年份前后流域内年输沙量呈显著的减少趋势;年输沙量突变年份后波动程度较突变年份前显著增大。

(3) 输沙量年内变化呈明显的单峰型,不同年份同一月份的月输沙量起伏变化很大,具有很大的随机性;年内输沙量主要集中在第二季度和第三季度,即 6—11 月份,而汛期输沙量所占全年输沙量比例高达 97% 以上,主汛期 7—9 月的输沙量占全年输沙总量的 72% 以上。

(4) 利用双累积曲线,得出输沙量相对降雨量在 1968 年和 1984 年发生突变,可将流域降水输沙演变关系分为三个阶段,第 I 阶段(1958—1968 年)至第 II 阶段(1969—1984 年)降雨量对输沙量的衰减影响为 0.08 亿 t,人类活动对输沙量的衰减影响为 0.36 亿 t,影响幅度分别为 19% 和 81%;第 II 阶段至第 III 阶段降雨量对输沙量的衰减影响为 0.04 亿 t,人类活动对输沙量的衰减影响为 0.80 亿 t,影响幅度分别为 5% 和 95%。

### 参考文献:

- [1] 许炯心. 人类活动和降水变化对嘉陵江流域侵蚀产沙的影响[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 432-433.
- [2] 长江水利委员会水文局. 嘉陵江水土保持措施对长江三峡工程减沙作用的研究[M]// 国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙课题专家组, 中国长江三峡工程开发总公司工程泥沙专家组. 长江三峡工程泥沙问题研究(1996—2000)(第四卷)长江三峡工程“九五”泥沙研究综合分析. 北京: 知识产权出版社, 1996—2000.
- [3] 长江水利委员会水文局. 嘉陵江水保治理前后水沙变化趋势研究[C]// 国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙课题专家组, 中国长江三峡工程开发总公司工程泥沙专家组. 长江三峡工程泥沙问题研究(1996—2000)(第四卷)长江三峡工程“九五”泥沙研究综合分析. 北京: 知识产权出版社, 1996—2000.
- [4] 张信宝. 长江上游河流泥沙近期变化、原因及减沙对策[J]. 中国水土保持, 1999(2): 22-24.
- [5] 张信宝, 文安邦. 长江上游干流和支流河流泥沙近期变化及其原因[J]. 水利学报, 2002, 27(4): 56-59.
- [6] 府仁寿, 虞志英, 金镠, 等. 长江水沙变化发展趋势[J]. 水利学报, 2003, 28(11): 21-29.
- [7] 许全喜, 石国钰, 陈泽方. 长江上游近期水沙变化特点及其趋势分析[J]. 水科学进展, 2004, 29(7): 420-426.
- [8] 毛红梅, 裴明胜. 近期人类活动对嘉陵江流域水沙量影响[J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 101-104.
- [9] 杜俊, 师长兴, 张守红, 等. 人类活动对长江上游近期输沙变化的影响[J]. 地理科学进展, 2010, 29(1): 15-22.
- [10] 许全喜, 陈松生, 熊明, 等. 嘉陵江流域水沙变化特性及原因分析[J]. 泥沙研究, 2008(2): 1-7.
- [11] 高鹏, 穆兴民, 王炜. 长江支流嘉陵江水沙变化趋势及驱动因素分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 57-61.
- [12] 丁文峰, 张平仓, 任红玉. 近 50 年来嘉陵江流域径流泥沙演变规律及驱动因素定量分析[J]. 长江科学学报, 2008, 25(3): 23-27.
- [13] 曹洁萍, 迟道才, 武立强, 等. Mann—Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J]. 农业科技与装备, 2008(5): 35-38.
- [14] 穆兴民, 张秀琴, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. 水文, 2010, 30(4): 47-51.